干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

塔里木河下游生态输水对地下水补给量研究

王万瑞[1,2]， 艾克热木·阿布拉[3]， 陈亚宁[1]， 朱成刚[1]， 陈亚鹏[1]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所/荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 新疆塔里木河流域管理局，新疆 库尔勒 841000）

摘 要： 地下水对干旱区荒漠生态系统的维持至关重要，生态输水对地下水的补给量及影响范围是评估输水成效的要素之一，对于准确理解地下水循环特征至关重要。基于2000—2020年塔里木河下游生态输水过程中的地下水监测数据，拟合输水前后地下水水面线方程，结合水均衡原理，对塔里木河下游近20 a生态输水过程中的地下水埋深时空变化、地下水补给量以及输水期地下水最大影响范围进行了估算与分析。结果表明：(1) 塔里木河下游实施生态输水后，地下水位呈明显抬升趋势，抬升幅度具时空差异性，在英苏、喀尔达依和阿拉干断面分别抬升了3.01 m、2.87 m、5.75 m；前10 a输水对地下水位抬升作用明显小于后10 a；(2) 塔里木河下游近20 a的输水对地下水的总补给量为30.6×10^8 m^3（占输水总量的36.2%），包气带补给40.1×10^8 m^3（47.5%），入台特玛湖水量为11.7×10^8 m^3（13.8%）；(3) 塔里木河下游前10 a的输水对地下水补给量（61.6%）大于后10 a（25.2%），主要归因于输水量增大，地下水埋深减小引起土壤含水量饱和差减小；(4) 塔里木河下游输水期地下水的最大影响范围具有较大的波动，与输水前地下水埋深和输水量正相关；近10 a，英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻断面，输水期地下水单侧影响范围高达1075 m、2326 m、1623 m、856 m。

关 键 词： 地下水位；地下水补给量；生态输水；塔里木河下游

文章编号：

塔里木河下游地处西北干旱区（87.34°~88.61°E，39.38°~40.68°N），属于典型大陆性干旱气候，年降水量30 mm左右，潜在蒸发量超过2500 mm，生态环境极为脆弱[1-3]。地下水是维系区域荒漠生态过程的重要水源[4-6]。20世纪50年代起，随着人口增加和灌溉农业扩张，导致水土资源过度开发，致使下游来水量锐减，特别是1972年大西海子水库建成以后，塔里木河下游河道断流，地下水位持续下降，严重威胁"绿色走廊"的生态安全[7-8]。为了挽救与恢复濒临毁灭的下游生态系统，自2000年5月起至2020年11月，实施了21次应急生态输水，其中，15次水头到达台特玛湖，有效抬升了地下水位[9-11]。塔里木河下游生态输水已显著改变区域地下水循环过程，因而，定量研究生态输水对地下水的补给量及影响范围，对于深刻理解地下水的补给和排泄过程至关重要。

塔里木河下游长期生态输水的效果如何，引起国内外各界的广泛关注[4]。针对此，众多学者从不同角度研究了输水后的地下水位变化[4,12]、横向影响范围[13]、地下水恢复量[11]、生态环境响应[9,14]及生态调度策略[4,15]等。Chen等[13]提出输水后河道两侧各250 m范围内的地下水位抬升显著，而450~750 m范围内不明显。杨鹏年等[11]推导了输水后地下水净恢复量的数学公式，并以此计算了第5次输水后地下水的净恢复量，可信度较高。湾疆辉等[16]基于塔里木河前8次生态输水数据，拟合了下游地下水埋深与离河岸距离的关系曲线，分析了生态输水对地下水的补给量及其横向影响范围。此外，杨鹏年等[17]

收稿日期： 2021-02-07； **修订日期：** 2021-03-25
基金项目： 科技部科技基础资源调查专项（2019FY100203）
作者简介： 王万瑞（1987-），男，博士研究生，主要从事生态水文及地下水数值模拟研究. E-mail: wangwanrui18@mails.ucas.ac.cn
通讯作者： 陈亚宁（1958-），男，博士，研究员，主要从事水资源与地表过程研究. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

利用Processing Modflow软件，模拟了英苏断面7次输水的地下水响应过程。然而，由于时限不同，所得结论也不尽一致，尚需深入研究20 a生态输水对地下水的补给量及其影响范围。

本文基于2000—2020年塔里木河下游地下水监测数据，拟合输水前后地下水水面线方程，结合水均衡原理，分析塔里木河下游近20 a生态输水过程中的地下水埋深时空变化特征，估算并分析了地下水补给量及输水期地下水的最大影响范围，以期为更好地实施生态输水提供科学依据和数据支撑。

1 数据与方法

1.1 数据

本文采用的地表水和地下水埋深监测数据均来自塔里木河流域管理局。2000—2020年水面蒸发量数据来自塔里木河下游铁干里克气象站φ20蒸发皿的实测值。地表水数据包括：2001—2020年大西海子和台特玛湖2个断面历次生态输水的下泄水量、持续时间、流程等实测数据。地下水埋深数据包括：2000—2020年英苏、喀尔达依、老英苏、博孜库勒、阿拉干、依干不及麻6个监测断面35眼监测井的月地下水埋深实测值。

为监测塔里木河下游生态输水对河道两侧地下水埋深的影响及其水文效应，沿下游输水河道布设了9个地下水监测断面。考虑数据时间序列的完整性和长期性，本文选取其中序列较长、资料完整的6个地下水监测断面进行统计分析，包括英苏、喀尔达依、老英苏、博孜库勒、阿拉干及依干不及麻断面，到大西海子水库（泄水口）的距离分别为61.4 km、117.8 km、58.0 km、86.0 km、204.5 km、300.5 km，具体位置见图1。上述6个监测断面中，英苏断面布设了5眼监测井，其余断面均布设了6眼监测井。塔里木河下游生态监测井已全部实现地下水埋深的自动监测和数据传输。

根据塔里木河下游水系特征（图1），大西海子水库至阿拉干段，主河道分为东西2支，西支为老塔里木河，东支为其文阔尔河，汇合于阿拉干。下游生态输水方式包括单通道输水与双通道输水。单通道输水是指大西海子水库的下泄水量仅流经其文阔尔河，向下游输水，该通道上的地下水监测断面包括英苏、喀尔达依、阿拉干及依干不及麻断面（图1）。双通道输水是指大西海子水库的下泄水量流经其文阔尔河与老塔里木河，向下游输水。其中，老塔里木河段内的监测断面包括老英苏与博孜库勒断面（图1），这2个断面处地下水位在单通道输水时几乎无变化。因而，本文选择英苏、喀尔达依、阿拉干及依干不及麻为4个典型断面，分析下游地下水埋深的时空变化特征。

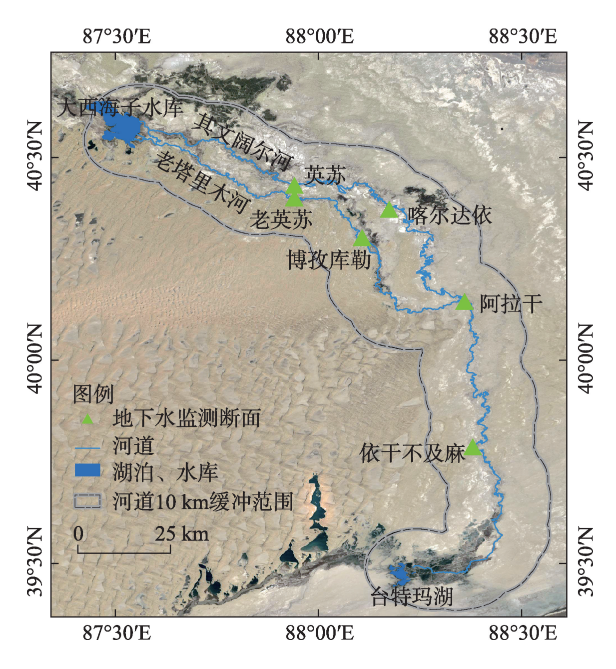


图1 研究区概况图

Fig. 1 Sketch map of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 输水对地下水的补给量 令河道断面一侧单位河长恢复水量为 Q_1，河床正下方的恢复水量为 Q_2，假设水位恢复曲线在河道两侧是对称的（图2），则全断面沿河道单位长度上的地下水补给量 Q 的计算公式为[11,18-19]：

$$Q = 2 \times Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

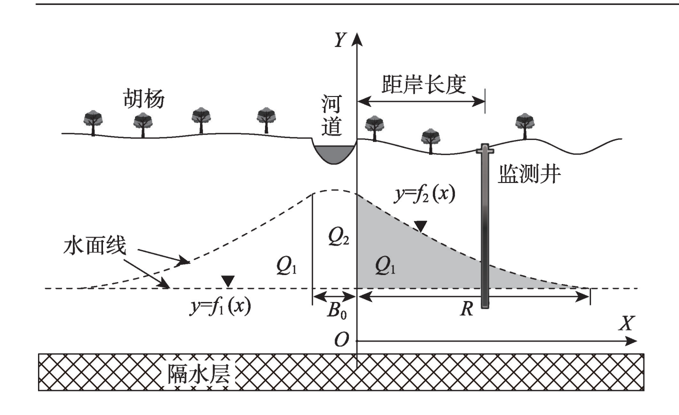
$$Q_1 = \mu \times \int_0^x \left[f_2(x) - f_1(x) \right] \mathrm{d}x \quad (2)$$

$$Q_2 = \mu \times \left[f_2(0) - f_1(0) \right] \times B_0 \quad (3)$$

$$\mu = 1.36 \times (25.8 - n)/100 \quad (4)$$

$$n = 35.72 \times \mathrm{e}^{-0.185D} \quad (5)$$

式中：$f_1(x)$ 为河道断面一侧输水前地下水水面线（m）；$f_2(x)$ 为河道断面一侧输水后地下水水面线（m）；$x=0$ 表示河岸处地下水位；μ 为土壤含水量饱和差；B_0 为河床的平均底宽（m）；n 为输水前断面两侧土壤平均重量含水率（%）；D 为地下水埋深（m）。



注：Q_1 表示河道一侧单位河长恢复水量；Q_2 表示河床正下方恢复水量；B_0 表示河床底宽；R表示输水期地下水单侧最大影响范围；$f_1(x)$ 表示河道断面一侧输水前地下水水面线；$f_2(x)$ 表示河道断面一侧输水后地下水水面线。

图2 单位长度地下水补给量计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of groundwater recharge per unit channel length calculation

其中，根据已有研究[20]，塔里木河下游土壤饱和重量含水率一般取25.8%，土壤干容重取1.36 g·cm^{-3}。

河段上游断面单位长度地下水补给量为 Q_{upper}（m^3），下游断面单位长度地下水补给量为 Q_{lower}（m^3），两断面间的河道距离为L（m），则此区间内地下水补给总量 W_G（m^3）的计算公式为[11]：

$$W_G = L \times \left(Q_{upper} + Q_{lower}\right)/2 \tag{6}$$

1.2.2 输水期地下水单侧最大影响范围 本研究对输水期内地下水单侧最大影响范围（R，m）进行了定义，即R为输水前地下水水面线与输水后地下水水面线交点处的横坐标值，计算公式为：

$$f_2(x) = f_1(x) \tag{7}$$

$$R = \min_{x_i > 0}\left(x_i\right) \tag{8}$$

式中：x_i 为方程（7）的正根，其余符号意义同前。

1.2.3 河道水面蒸发量 输水期河道水面蒸发量的计算公式为：

$$W_E = \varepsilon \times E_0 \times L \times B \times t \tag{9}$$

式中：W_E 为河道水面蒸发量（m^3）；ε 为水面蒸发量折算系数，取0.63；E_0 为ϕ20蒸发皿观测值（mm）；L为水流的长度（km）；B为河道水面平均宽度（m）；t为每次输水的总历时（月）。

1.2.4 包气带补给量 包气带补给量采用水量平衡来计算：

$$W_V = W_A - W_G - W_E - W_L \tag{10}$$

式中：W_V 为包气带补给量（m^3）；W_A 为河道来水总量（m^3）；W_L 为台特玛湖入湖水量（m^3），数据来源于监测数据；其余符号意义同前。

2 结果与讨论

2.1 地下水埋深的时空变化特征

2.1.1 时间变化

近50 a塔里木河下游河岸附近的地下水埋深呈现明显的时空变化（表1）。1972年塔里木河下游河道断流，由于潜水蒸发强烈、地表来水稀缺及荒漠河岸林根系吸水，致使沿河一定范围的地下水埋深持续增大[11]。2000年起实施生态输水，下游地下水埋深呈现明显的减小趋势，且地下水埋深的减小幅度具有时空差异性。2000—2020年，英苏、喀尔达依和阿拉干断面的地下水埋深，分别减小了3.01 m、2.87 m和5.75 m（表1）。2020年，英苏、阿拉干和依干不及麻断面的地下水埋深均小于5 m，喀尔达依断面的地下水埋深小于6 m。

近20 a生态输水，致使输水间歇期下游河岸附近的地下水埋深明显减小，且减小幅度有显著的时空差异。图3显示了2000—2020年输水前后4个典型断面距河50 m处的地下水埋深变化。可以看出，近20 a，英苏、喀尔达依、依干不及麻断面，输水间歇

表1 1973—2020年塔里木河下游4个典型监测断面地下水埋深变化

Tab. 1 Variations of groundwater depth at the four monitoring sections in the lower reaches of Tarim River from 1973 to 2020

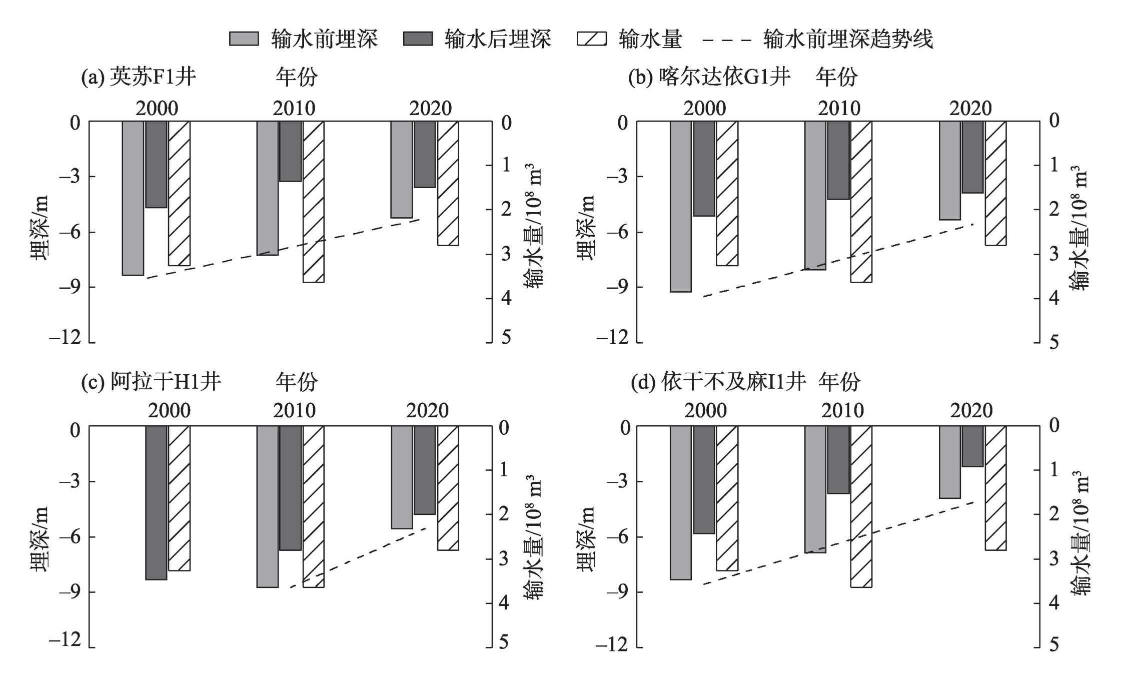
/m

监测断面	1973年	1989年	1997年	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
英苏	5.44	8.00	9.40	7.27	5.05	6.79	7.84	4.26
喀尔达依	5.86	10.00	11.13	8.46	6.58	7.28	6.11	5.59
阿拉干	7.00	10.40	12.65	10.47	5.98	8.47	7.41	4.72
依干不及麻	6.20	12.75	12.92	–	5.62	7.07	–	4.11

注：“–”表示无监测数据；1973、1989、1997年地下水埋深数据来源于杨鹏年等[11]。

期地下水埋深分别减小了3.11 m、3.90 m、4.41 m。2000—2010年，前11次输水总量约为26.3×10^8 m^3，上述3个断面输水间歇期地下水埋深的减幅分别为1.11 m、1.18 m、1.44 m。2010—2020年，后11次输水总量约为61.7×10^8 m^3，英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻断面，输水间歇期地下水埋深的减幅分别为2.00 m、2.72 m、3.19 m、2.97 m。这表明，随着输水的持续进行，地下水埋深的响应变幅逐渐减小，相对而言，更大比例输水量渗漏补给包气带，最终耗散于土壤蒸发和植被蒸腾[16,21]。

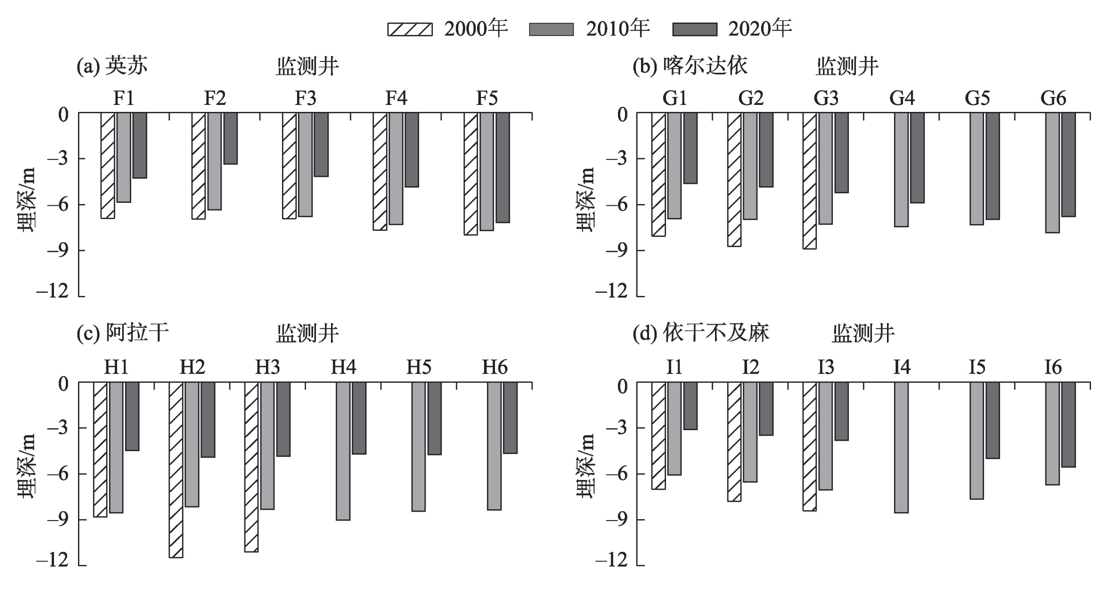
2.1.2 空间变化 图4显示了2000—2020年4个典型断面离河不同距离处的地下水埋深变化。整体



注：F1、G1、H1和I1分别表示英苏断面、喀尔达依断面、阿拉干断面和依干不及麻断面距离河道最近的监测井。

图3 不同年份塔里木河下游生态输水前后典型监测断面地下水埋深

Fig. 3 Groundwater depth at the typical monitoring sections pre- and post-conveyance of water in the lower reaches of Tarim River in 2000, 2010 and 2020



注：F1~F5、G1~G6、H1~H6和I1~I6分别表示英苏断面、喀尔达依断面、阿拉干断面和依干不及麻断面处距离河道由近至远的监测井。

图4 不同年份塔里木河下游4个典型监测断面地下水埋深的年均值

Fig. 4 Average annual groundwater depth at the four monitoring sections in the lower reaches of Tarim River in 2000, 2010 and 2020

而言，21次输水对地下水位的抬升作用呈现空间异质性。英苏断面距大西海子水库61.4 km，2000—2010年地下水埋深减小0.48 m，2010—2020年埋深减小2.53 m。喀尔达依断面距大西海子水库117.8 km，2000—2010年、2010—2020年埋深分别减小1.18 m、1.69 m。阿拉干断面距大西海子水库204.5 km，2000—2010年、2010—2020年埋深分别减小2.00 m、3.75 m。依干不及麻断面距大西海子水库300.5 km，2010—2020年埋深减小2.96 m。综上，前10 a生态输水对地下水位的抬升作用明显小于后10 a的，主要归因于2004—2009年次输水量明显减小，而2010年以后次输水量加大，进而致使埋深迅速减小[4]。同时，不同断面地下水埋深的减幅差异显著，与距泄水口距离的关系较小，表明除下泄水量之外，其他因素也对地下水位变化具有重要作用[22]。

从图4可以看出，一般离河越近的地方，2000—2020年地下水埋深的减小幅度越大，反之亦然。英苏断面5眼监测井的地下水埋深，输水之前差异较小，20 a输水后差异明显，喀尔达依和依干不及麻断面也表现出相似的变化特征。在阿拉干断面，离河不同距离的6眼监测井地下水埋深，输水之前与输水后差异均不明显，可能归因于局部地形地貌特征、水文地质条件等[4]。此外，上述4个断面离河不同距离处的地下水埋深，均表现出2000—2010年的埋深减小幅度明显小于2010—2020年，表明地下水埋深与输水量和输水时间密切相关[16]。

2.2 生态输水对地下水的补给量

2.2.1 输水前后地下水面线方程 基于次输水前后地下水位监测数据，拟合2010—2020年各断面逐次输水前后地下水位与离河距离的相关关系曲线（图5）。拟合结果显示，各断面逐次输水后的地下水面线方程均为二次多项式，且拟合曲线的R^2均达到0.9以上，表明拟合效果较好。

从图5可以看出，对于输水后地下水面线，离河越近的区域，地下水位越高、水力坡度越大；反之，随着离河距离的增大，地下水位逐渐降低、水力坡度逐渐减小；远至离河一点距离之处，水力坡度趋于0，该点处输水前后地下水面线相交。同时，输水后地下水面线方程的系数，在各监测断面和次输水之间均表现出差异性（图5），表明水力坡度与输水量、输水前水位、土壤属性等密切相关[19]。塔里木河下游地下水埋深较大，输水期内河道水位远高于地下水位，致使河岸两侧一定范围内的水力坡度较大，进而引起河道下方的地下水不断向两侧和下游方向流动，导致离河越近的区域地下水位抬升更快更大，离河较远的区域因存在一定滞后性而水位抬升较慢较小[17]。输水间歇期内，初始时河岸两侧的水力坡度大于0，因而河道下方的地下水继续向两侧流动，致使一定区域内的地下水位不断抬升、横

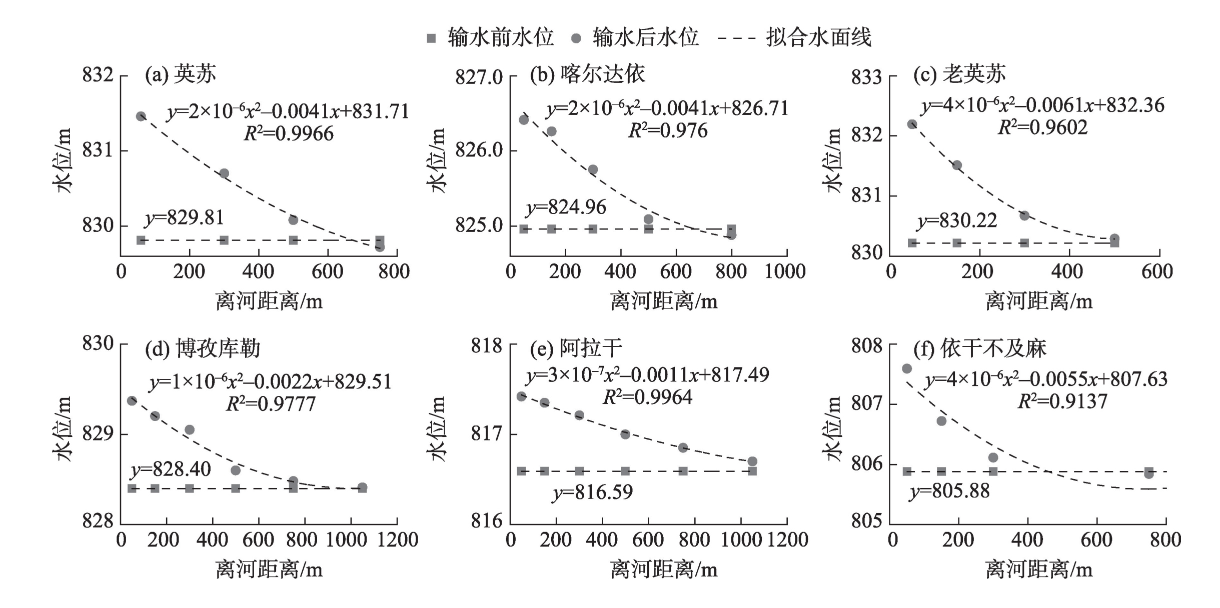


图5 2020年塔里木河下游各监测断面生态输水前后地下水位变化

Fig. 5 Variations of groundwater level at the six monitoring sections pre- and post-conveyance of water in the lower reaches of Tarim River in 2020

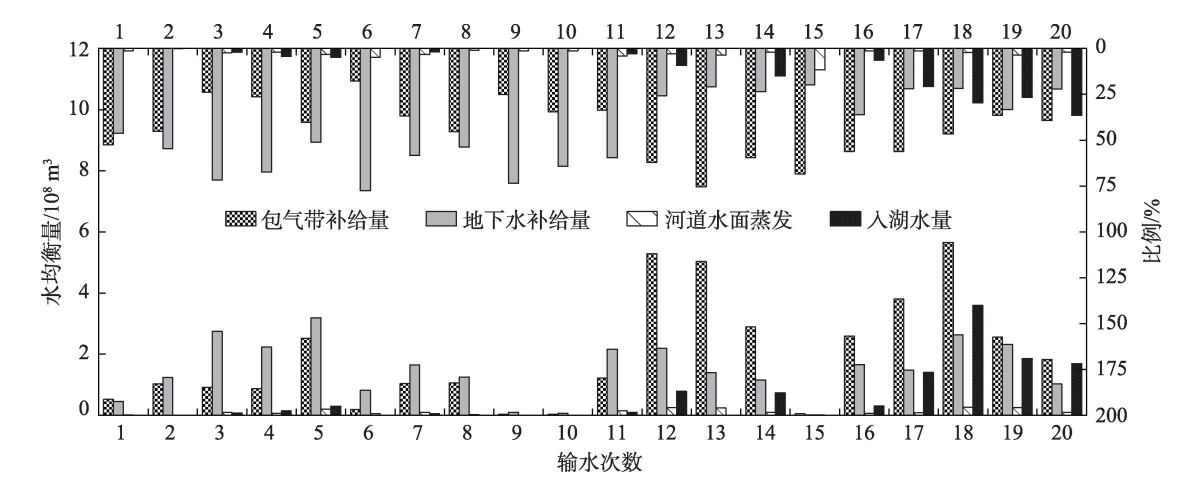
向水位差不断减小，直至横向水力坡度为0[16]。

第21次生态输水（2020年）前后各监测断面地下水位变化特征如图5所示。整体而言，输水期各监测井的地下水位均明显上升，离河越近的断面地下水位上升幅度越大。在英苏断面，离河距离50 m、300 m、500 m处地下水位上升幅度分别为1.65 m、0.89 m、0.27 m；在喀尔达依断面，离河距离50 m、150 m、300 m、500 m处地下水位上升幅度分别为1.45 m、1.30 m、0.79 m、0.13 m；在阿拉干断面，离河距离50 m、150 m、300 m、500 m、750 m、1050 m处地下水位上升幅度分别为0.83 m、0.76 m、0.62 m、0.41 m、0.26 m、0.11 m；在依干不及麻断面，离河距离50 m、150 m、300 m处地下水位上升幅度分别为1.71 m、0.84 m、0.23 m（图5）。综上，次输水期内地下水位上升幅度呈现显著的空间异质性，一般距泄水口越远的断面地下水位上升幅度相对越小，可能主要归因于输水量沿程逐渐耗散减小及下垫面条件空间差异性[22]。

2.2.2 地下水补给量 基于上述拟合的逐次输水前后地下水水面线方程，利用公式（1~6），估算出2010—2020年逐次输水各河段的地下水补给量，再对各河段的计算结果求和，可得到整个塔里木河下游的地下水总补给量（图6）。同时，将2010—2013年地下水补给量的计算结果，与同时期的邓铭江等[4]计算结果对比，分析发现两者相一致，表明本文的地下水补给量估算结果可信度较高。从图6可看出，整体而言，生态输水对地下水的补给量呈现显著的时间差异性。

2011年之前，前11次生态输水共下泄水量26.3×10^8 m^3，次生态输水对地下水的补给量所占比例介于46%~78%（图6）。2011年之后，后10次生态输水下泄水量58.1×10^8 m^3，次生态输水对地下水的补给量占比介于20%~40%。这表明2011年以后地下水补给量显著减小，主要归因于后10 a的生态输水量较大，致使河岸附近地下水埋深快速变小，进而导致土壤含水量饱和差不断减小，导致更大比例的包气带补给量及入湖水量（台特玛湖）[22]。2000—2010年，11次输水对地下水的补给量所占比例平均约为61.6%；2011—2020年，第12~21次输水平均约25.2%下泄水量补给地下水；2000—2020年，21次生态输水总量为84.45×10^8 m^3，其中补给地下水量约为30.6×10^8 m^3，约占输水量的36.2%（图6）。

同时，近20 a生态输水对地下水的补给量呈现明显的空间差异。图7显示了2010—2020年下游各河段输水对地下水的补给量及其占比。2010年第11次输水，其文阔尔河段、老塔里木河段及阿拉干—台特玛湖段地下水补给量所占总补给量的比例分别为52.8%、12.0%和35.2%。2015年第16次输水，上述3个河段地下水补给量占总补给量的百分比分别为71.3%、11.6%和17.2%。2020年第21次输水，上述3个河段地下水补给量占总补给量的百分比分别为50.3%、20.2%和29.5%。总体而言，一般

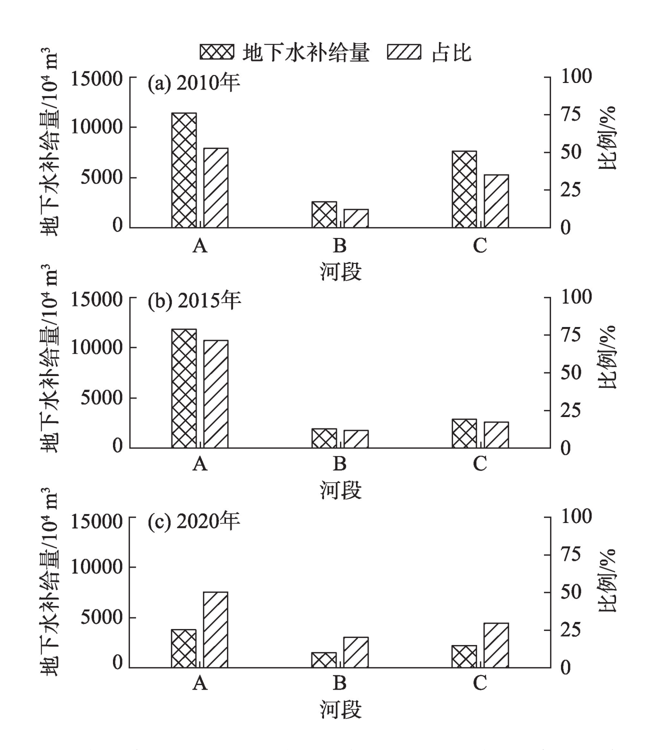


注：前10次水均衡数据来源于参考文献[23]。

图6 塔里木河下游21次生态输水水均衡量及其所占比例变化

Fig. 6 Water equilibrium amount and its total proportion for the 21 times ecological water conveyances in the lower reaches of Tarim River

其文阔尔河段地下水补给量所占输水量的比例远大于老塔里木河段,且距泄水口(大西海子水库)越远,则补给地下水量所占比例越小(图7)。这主要是因为生态输水优先通过其文阔尔河[14],由于其河道更顺直宽阔,以及沿途河水耗散引起河道水量不断减少,进而导致入渗补给地下水量减少[22]。



注:A表示其文阔尔河段;B表示老塔里木河段;C表示阿拉干—台特玛湖。

图7 2010—2020年塔里木河下游各区段地下水补给量及其占比变化

Fig. 7 Groundwater recharge and its total proportion at different district in the lower reaches of Tarim River from 2010 to 2020

2.2.3 生态输水水量平衡 基于逐次输水量数据,利用公式(9)估算出逐次输水期的河道水面蒸发量,最后利用水量平衡方程[公式(10)],计算得到逐次输水对包气带的补给量。2000—2020年塔里木河下游生态输水水均衡量及其所占比例变化如图6所示。从图6可看出,第1~2次输水,河水主要耗散于包气带和地下水补给,二者占整个输水量的比例接近,约50%左右。随着后续输水,第3~11次输水期间,输水主要耗散于地下水补给(51%~78%),其次为包气带补给(17%~46%),河道水面蒸发与入湖水量占比很小(均<5%)。相反,第12~21次输水期间,生态输水主要耗散于包气带补给(36%~76%),其次为地下水补给(19%~36%),入湖水量占比逐渐增加(最高达36.5%),而河道水面蒸发量变化很小。这可能主要归因于多次生态输水引起局部气候条件、植被状况、土壤属性、水文地质条件等发生不同程度变化[14]。

图6显示,2000—2020年塔里木河下游21次生态输水总量84.45×10^8 m^3,其中,包气带补给量约40.1×10^8 m^3(47.5%),地下水补给量约30.6×10^8 m^3(36.2%),河道水面蒸发量约2.1×10^8 m^3(2.5%),入台特玛湖水量约11.7×10^8 m^3(13.8%)。由于塔里木河下游降水稀缺、地表径流少及蒸发强烈,厚层包气带内土壤含水量较低,输水期补给包气带的水分主要耗散于土壤蒸发及深根荒漠河岸林的生理用水[14]。补给地下水的水分主要用于提升河岸附近地下水位,近20 a英苏断面离河50 m处地下水位抬升幅度超过3 m。然而,随着输水的持续实施,河岸附近地下水位不断抬升,土壤含水量饱和差逐渐减小,输水对地下水的补给量相应减小,导致地下水位上升速率减小[16]。

塔里木河下游近20 a输水工程的连续实施,已显著影响区域水文和生态环境。21次生态输水过程中,共有15次水头到达台特玛湖,导致曾干涸的台特玛湖水域面积逐渐扩大[14],水面和湿地面积一度达到511 km^2。同时,下游河岸附近的浅层地下水水质得到明显改善[14],距河道1 km处的地下水矿化度由2000年的5.3~7.8 g·L^{-1}降低至2017年的1.1~3.0 g·L^{-1},说明长期生态输水有效保护和恢复了下游的水环境。此外,已有研究发现,近20 a下游输水后的生态环境效益显著[4]。近20 a,塔里木河下游植被面积总体上呈增加趋势[24],相比于2000年,2015年植被面积净增加了382.85 km^2。遥感监测显示,2000年以来下游植被覆盖度呈现出波动变化,2000—2005年呈现快速上升趋势,2006—2009年呈现波动下降,而2010—2017年呈稳步上升趋势[25]。

2.3 输水期地下水的单侧最大影响范围

基于上述拟合的输水前后地下水面线方程,利用公式(7~8),估算出2010—2020年各监测断面逐次输水期地下水的单侧最大影响范围(图8)。从图8可以看出,输水期地下水的单侧最大影响范围呈现显著的时空差异性。随着输水的持续实施,输水期地下水的单侧最大影响范围呈现出较大的波

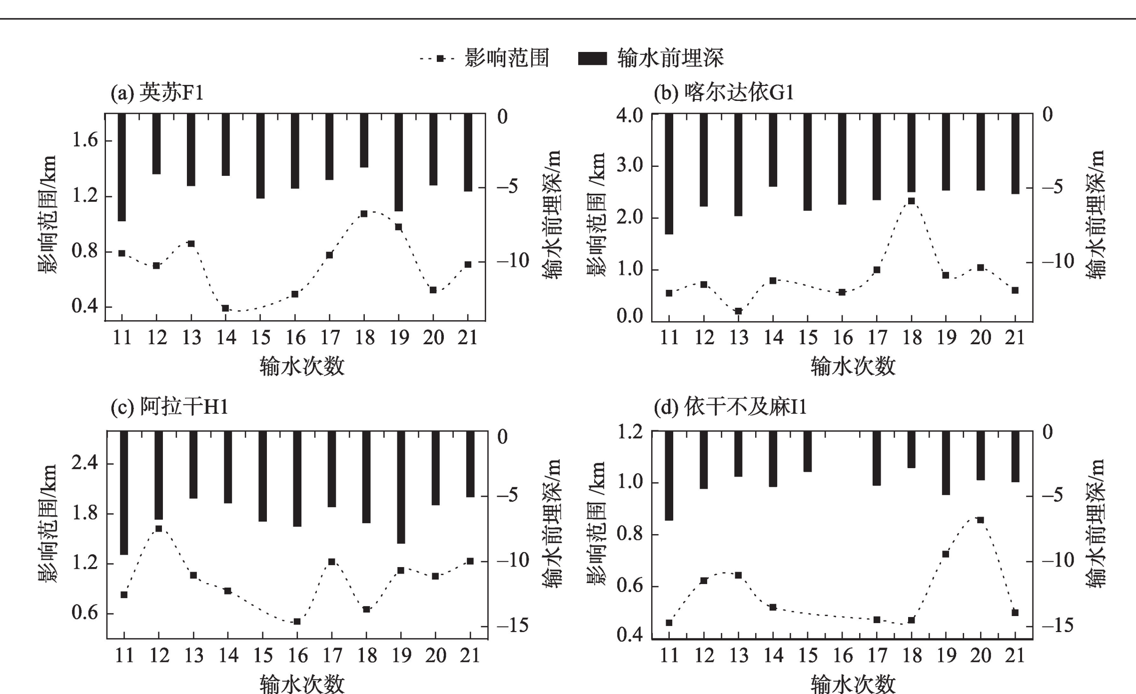


图8　2010—2020年塔里木河下游4个监测断面输水期地下水的单侧最大影响范围变化特征

Fig. 8　The maximum influence range of groundwater during water conveyance at the four monitoring sections in the lower reaches of Tarim River from 2010 to 2020

动。随着输水次数的增加，地下水的单侧最大影响范围先显著增大而后趋于动态稳定。同时，地下水的单侧最大影响范围与次输水量密切相关，次输水量较少或甚至为零，对应时段的影响范围则较小，且后续一定时段内地下水的影响范围有明显的增大趋势（图8）。

具体而言，2020年，英苏、喀尔达依、阿拉干及依干不及麻断面，输水期地下水的单侧最大影响范围分别约为708 m、606 m、1232 m、500 m。2010—2020年，上述4个典型断面输水期地下水的单侧最大影响范围分别为392~1075 m、207~2326 m、506~1623 m、460~856 m，分别于2017、2017、2011年及2019年出现最大值（图8）。输水期地下水的单侧最大影响范围是多种因素综合作用的结果，包括次输水量和持续时间、次输水的起讫时间、累积输水总量、地下水埋深、地形地貌、土壤质地和含水量、蒸发强度等[11]。其中，输水前地下水埋深和输水量是输水期地下水单侧最大影响范围的主控因素（图8），均呈现正相关关系。一般而言，输水前地下水埋深和输水量越小，则地下水的最大影响范围越小，可能归因于地下水面的顶托作用、水力梯度大小及潜水蒸发状况[16,19]。

3　结 论

利用塔里木河下游2000—2020年地下水监测数据，拟合输水前后地下水水面线方程，结合水均衡原理，对过去20 a塔里木河下游生态输水后的地下水埋深时空变化、地下水补给量及输水期地下水最大影响范围等进行估算分析，主要结论如下：

（1）生态输水后，地下水埋深呈明显减小趋势，减小幅度具时空差异性。近20 a，英苏、喀尔达依和阿拉干断面的地下水埋深，分别减小了3.01 m、2.87 m和5.75 m。前10 a输水对地下水位抬升作用明显小于后10 a，归因于近10 a生态输水强度加大。

（2）20 a输水对地下水补给量为30.6×10^8 m^3，占总下泄水量的36.2%，包气带补给量为40.1×10^8 m^3（占47.5%），河道水面蒸发量为2.1×10^8 m^3（占2.5%），入台特玛湖水量为11.7×10^8 m^3（占13.8%）。前10 a输水的地下水补给量（占61.6%）大于后10 a（占25.2%），主要归因于2011年以后输水量增大，地下水埋深减小而引起土壤含水量饱和差减小。

（3）拟合了各断面逐次输水前后地下水水面线方程，R^2均超过0.9，可信度较高。输水期地下水的单侧最大影响范围表现出较大的波动，与输水前地

下水埋深和输水量正相关。近10 a,英苏、喀尔达依、阿拉干、依干不及麻断面,输水期地下水单侧最大影响范围分别可高达1075 m、2326 m、1623 m、856 m。

上述研究结果显示,连续多次输水后,河岸附近地下水抬升幅度、地下水补给量及输水的影响范围的增量逐渐减小,表明后期输水的生态环境效应可能具有较大的提升空间,因而,建议未来制定生态调水方案时,在保证输水期生态基流前提下,应基于前一次输水的水文效应,确定本次输水的地下水补给量及地下水位,进而反推出输水量,可优化输水方案及提高下泄水的利用效率。

参考文献(References)

[1] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 科技支撑新疆塔里木河流域生态修复及可持续管理[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 901-907. [Chen Yaning, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Science in supporting the ecological restoration and sustainable development of the Tarim River Basin[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 901-907.]

[2] Huang T M, Pang Z H. Changes in groundwater induced by water diversion in the lower Tarim River, Xinjiang Uygur, NW China: Evidence from environmental isotopes and water chemistry[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(3): 188-201.

[3] 赵俊红, 周华荣, 卢雅焱, 等. 2000—2015年塔里木胡杨林国家级自然保护区NPP时空动态特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 190-200. [Zhao Junhong, Zhou Huarong, Lu Yayan, et al. Temporal-spatial characteristics and influencing factors of the vegetation net primary production in the National Nature Reserve of *Populus euphratica* in Tarim from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 190-200.]

[4] 邓铭江, 周海鹰, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水与生态调度研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(8): 864-876. [Deng Mingjiang, Zhou Haiying, Xu Hailiang, et al. Research on the ecological operation in the lower reaches of Tarim River based on water conveyance[J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(8): 864-876.]

[5] 唐敏, 张峰, 师庆东. 克里雅河尾闾绿洲浅层地下水位埋深变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 80-88. [Tang Min, Zhang Feng, Shi Qingdong. Characteristic variations in the groundwater table depth of the Daliyaboyi Oasis, Keriya River, China[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 80-88.]

[6] 张经天, 席海洋. 荒漠河岸林地下水位时空动态及其对地表径流的响应[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 388-397. [Zhang Jingtian, Xi Haiyang. Spatiotemporal dynamics of groundwater levels in a desert riparian forest and its response to surface runoff[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 388-397.]

[7] Ling H B, Guo B, Yan J J, et al. Enhancing the positive effects of ecological water conservancy engineering on desert riparian forest growth in an arid basin[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106797, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106797.

[8] Chen Y N, Wang Q, Li W H, et al. Rational groundwater table indicated by the eco-physiological parameters of the vegetation: A case study of ecological restoration in the lower reaches of the Tarim River[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(1): 8-15.

[9] Ling H B, Xu H L, Guo B, et al. Regulating water disturbance for mitigating drought stress to conserve and restore a desert riparian forest ecosystem[J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 659-670.

[10] 陈亚宁, 陈亚鹏, 朱成刚, 等. 西北干旱荒漠区生态系统可持续管理理念与模式[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7410-7417. [Chen Yaning, Chen Yapeng, Zhu Chenggang, et al. The concept and mode of ecosystem sustainable management in arid desert areas in northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7410-7417.]

[11] 杨鹏年, 董新光, 吾买尔江. 塔里木河下游第五次应急输水后地下水恢复量的计算[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 1-6. [Yang Pengnian, Dong Xinguang, Omerjan. Calculation of groundwater recharge volume after the fifth emergency water transfer to the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 1-6.]

[12] 古力米热·哈那提, 张音, 关东海, 等. 生态输水条件下塔里木河下游断面尺度地下水流数值模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 61-70. [Gulimire Hanati, Zhang Yin, Guan Donghai, et al. Numerical simulation of groundwater flow at cross-section scale in the lower reaches of Tarim River under the condition of ecological water conveyance[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 61-70.]

[13] Chen Y N, Zhang X L, Zhang Y M, et al. Analysis on the ecological benefits of the stream water conveyance to the dried-up river of the lower reaches of the Tarim River[J]. Sci China Ser D-Earth Sci, 2004, 47: 1053-1064.

[14] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238-247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqing, Chen Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238-247.]

[15] 邓铭江, 杨鹏年, 周海鹰, 等. 塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 717-726. [Deng Mingjiang, Yang Pengnian, Zhou Haiying, et al. Water conversion and strategy of ecological water conveyance in the lower reaches of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 717-726.]

[16] 湾疆辉, 陈亚宁, 李卫红, 等. 断流河道输水对地下水净补给量

研究——以塔里木河下游为例[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 376-382. [Wan Jianghui, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Study on net groundwater recharge after ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 376-382.]

[17] 杨鹏年, 邓铭江, 李霞, 等. 塔里木河下游间歇输水下地下水响应宽度—以塔里木河下游英苏断面为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 331-335. [Yang Pengnian, Deng Mingjiang, Lixia, et al. Respond width of groundwater level after conveying stream water to the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang: A case study along the Yengisu Section in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(3): 331-335.]

[18] 宋郁东, 樊自立, 雷志栋, 等. 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000: 50-160. [Song Yudong, Fan Zili, Lei Zhidong, et al. Research on water resources and ecology of Tarim River[M]. Urumqi: Xinjiang People's Press, 2000: 50-160.]

[19] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995. [Wang Dachun, Zhang Renquan, Shi Yihong, et al. Hydrogeology basis[M]. Beijing: Beijing Geology Press, 1995.]

[20] 新疆地矿局第一勘察院. 塔里木河干流流域水文地质及地下水开发利用调查[R]. 乌鲁木齐: 新疆地矿局第一勘察院, 1990. [The First Reconnaissance Institute of Xinjiang Geologic and Mineral Bureau. Investigation on hydrogeology and groundwater exploitation along the mainstream of Tarim River[R]. Urumqi: The First Reconnaissance Institute of Xinjiang Geologic and Mineral Bureau, 1990.]

[21] Xi H Y, Feng Q, Zhang L, et al. Groundwater storage changes and estimation of stream lateral seepage to groundwater in desert riparian forest region[J]. Hydrology Research, 2018, 49(3): 861-877.

[22] 陈亚宁, 郝兴明, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河流域水系连通与生态保护对策研究[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(10): 1156-1164. [Chen Yaning, Hao Xingming, Chen Yapeng, et al. Study on water system connectivity and ecological protection countermeasures of Tarim River Basin in Xinjiang[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(10): 1156-1164.]

[23] 艾尔肯·艾白不拉, 杨鹏年, 吴文强, 等. 塔里木河下游生态输水量转化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 54-58. [Arkin Abibulla, Yang Pengnian, Wu Wenqiang, et al. Analysis of transformation of ecological water quantity in lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(5): 54-58.]

[24] 王珊珊, 王金林, 周可法, 等. 塔里木河下游土地利用/覆被变化对生态输水的响应[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 69-74, 80. [Wang Shanshan, Wang Jinlin, Zhou Kefa, et al. Response of land use/land cover change to ecological water transmission in the lower reach of Tarim River[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 69-74, 80.]

[25] 朱长明, 李均力, 沈占锋, 等. 基于MODIS密集时间序列数据的塔里木河下游植被活动过程监测[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 179-188. [Zhu Changming, Li Junli, Shen Zhanfeng, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation activities in the lower reach of the Tarim River based on MODIS intensive time series data[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 179-188.]

Groundwater recharge during ecological water conveyance in the lower reaches of Tarim River

WANG Wanrui[1,2], Aikeremu Abula[3], CHEN Yaning[1],
ZHU Chenggang[1], CHEN Yapeng[1]

(1. Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumgi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Xinjiang Tarim River Basin Authority, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Groundwater is very important for the maintenance of desert ecosystems in arid areas. A water conveyance project was initiated in 2000 to curb the severe ecological deterioration of the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China, which has extensively affected groundwater recharge and discharge processes in the region. Groundwater recharge by water diversion and its influence range are key factors to consider when evaluating the ecological effects of water conveyance. Knowledge of the effects of these factors is crucial to obtain a deeper understanding of the characteristics of the groundwater cycle. The characteristics of groundwater recharge during water conveyance in the lower reaches of Tarim River are incompletely understood. This paper used groundwater monitoring data to examine the spatiotemporal variations of groundwater depth following ecological water conveyance to the lower reaches of Tarim River from 2000 to 2020. The groundwater recharge resulting from water conveyance and the maximum influence range of the latter for the former were evaluated by fitting the data to a groundwater table line equation before and after water conveyance, and the water balance for conveyance in the last 20 years was calculated. Results showed that (1) the groundwater level clearly increases in a spatiotemporal-dependent manner following ecological water conveyance to the study area. The groundwater level at the Yingsu, Kaerday, and Alagan sections of the river increased by 3.01 m, 2.87 m, and 5.75 m, respectively, from 2000 to 2020. The effect of water conveyance on groundwater level variations over the first 10 years was significantly less than that over the last 10 years because of differences in water transfer quantity and soil moisture content. (2) The groundwater recharge volume in the lower reaches of Tarim River over the last 21 years due to water conveyance was 30.6×10^8 m^3 (36.2% of the total water conveyance), and the amounts of recharge into the aeration zone and Taitema Lake were 40.1×10^8 m^3 (47.5%) and 11.7×10^8 m^3 (13.8%), respectively. (3) The groundwater recharge volume from water conveyance in the first 10 years (61.6% of the total water conveyance) was greater than that in the last 10 years (25.2% of the total water conveyance), because increased water conveyance decreased the difference in soil moisture saturation between time periods. (4) The maximum influence range of groundwater during water conveyance showed remarkable fluctuations and was positively correlated with the water conveyance amount and groundwater depth pre-conveyance. In the last 10 years covered by this study, the maximum groundwater influence ranges on one side of the river channel during water conveyance to the Yingsu, Kaerdayi, Alagan, and Yiganbujima sections of the river were 1075 m, 2326 m, 1623 m, and 856 m, respectively. The results could contribute to the development of more effective water diversion projects in the future.

Key words: groundwater level; groundwater recharge; ecological water conveyance; the lower reaches of the Tarim River